

УДК 621.316

## ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

**Обуховский А. И.****Научный руководитель – доцент Данеев В.В.*****Восточно-Сибирский Государственный Технологический Университет***

### **1. Общие положения**

Главным резервом экономии электроэнергии в системах электроснабжения является в настоящее время применение энергосберегающих технологий (совершенствование существующих и применение новых).

Для каждой отрасли промышленности доля энергетической составляющей в себестоимости выпускаемой продукции разная. Так, например, в черной металлургии это 40%, в машиностроении 20%, в производстве воды 30% и т.д. Но и тогда, когда доля энергетической составляющей в себестоимости незначительна, экономное расходование электроэнергии дает возможность выработать дополнительную продукцию, в то время как ущерб при недоотпуске энергии во много раз превышает ее стоимость.

Экономия электроэнергии означает прежде всего уменьшение потерь электроэнергии во всех звеньях системы электроснабжения и в самих электроприемниках, имеется ввиду технические потери. Основными путями снижения потерь электроэнергии в системах электроснабжения являются следующие:

1) *рациональное построение системы электроснабжения*, при ее проектировании и реконструкции, включающее в себя применение рациональных:

- а) напряжений;
- б) мощности и числа трансформаторов на трансформаторных подстанциях;
- в) общего числа трансформаций;
- г) места размещения подстанций;
- д) схемы электроснабжения;
- е) компенсации реактивной мощности и др;

2) *снижение потерь электроэнергии* в действующих системах электроснабжения, включающее в себя следующее:

- а) управление режимами электропотребления;
- б) регулирование напряжения;
- в) ограничение холостого хода электроприемников;
- г) модернизация существующего и применение нового, более экономичного и надежного технологического и электрического оборудования;
- д) повышение качества электроэнергии;
- е) применение экономически целесообразного режима работы силовых трансформаторов;
- ж) замена АД на СД, где это возможно;
- з) автоматическое управление освещением в течение суток;
- и) применение рациональных способов регулирования режимами работы насосных и вентиляционных установок и др.;

3) *нормирование электропотребления*, разработка научно обоснованных норм удельных расходов электроэнергии на единицу продукции; нормирование электропотребления предполагает наличие на предприятиях систем учета и контроля расхода электроэнергии;

4) *организационно-технические мероприятия*, которые разрабатываются конкретно на каждом предприятии с учетом его специфики.

Известно, что при передаче электроэнергии от источника к приемнику теряется 10-15% электроэнергии, отпущенной с шин подстанций.

Ниже рассмотрены более подробно некоторые пути экономии электроэнергии.

## 2. Экономия электроэнергии в силовых трансформаторах

При загрузке силового трансформатора на 30% нагрузочные потери примерно равны потерям холостого хода. В среднем на каждой трансформации теряется до 7% передаваемой мощности. Работа трансформатора в режиме холостого хода или близком к нему вызывает излишние потери электроэнергии не только в самом трансформаторе, но и по всей системе электроснабжения (от источника питания до самого трансформатора) из-за низкого коэффициента мощности.

В целях экономии электроэнергии целесообразно отключать малозагруженные трансформаторы при сезонном снижении нагрузки. Было подсчитано, что за счет сезонного отключения трансформаторов на 35 и 110 кВ можно получить экономию электроэнергии около 190 млн. кВт·ч в год в целом по стране. Такие отключения возможны на двух-трансформаторных подстанциях. На практике это применяется редко, в основном, сезонно из-за низкого ресурса масляных выключателей. Предлагается отключение одного трансформатора производить автоматически в зависимости от загрузки, при этом заменить масляные выключатели на вакуумные, ресурс которых неограничен.

## 3. Сокращение числа трансформации

Значительную экономию электроэнергии можно получить за счет сокращения числа трансформаций. Как указывалось выше, в каждом трансформаторе теряется до 7% передаваемой мощности, поэтому вопросы рационального числа трансформаций в системе электроснабжения имеют важное значение. Основными причинами излишнего числа трансформаций являются, неправильный выбор напряжения (питающей распределительной сетей) без учета перспективы развития промышленного предприятия.

Значительную экономию электроэнергии можно получить также, уменьшив мощность цеховых трансформаторов за счет компенсации реактивной мощности (КРМ). Этот вопрос, относящийся одновременно и к трансформаторам, и в целом к кабельным сетям, рассмотрен далее.

## 4. Экономия электроэнергии в сетях

Известно, что большая часть потерь активной мощности падает на распределительные сети 0,22—10 кВ, несмотря на то, что в эти сети вкладывается значительно больше цветного металла, чем в сети 35—110 кВ (табл.1).

Таблица 1. Потери активной мощности и расход цветного и расход цветного металла

Напряжение сетей, кВ	Потери активной мощности, % потребляемой	Расход цветного металла, %
110	25	14
35	10	6
0,22-	65	80
Всего	100	100

Из таблицы 1 видно, что наиболее действенными мероприятиями по снижению потерь мощности и электроэнергии являются те, которые снижают эти потери в сетях 0,22—10 кВ.

Как известно, потери активной мощности  $\Delta P_{\text{л}}$  в кабельных линиях равны:

$$\Delta P_{\text{л}} = 3 \cdot I_{\text{л}}^2 \cdot R_{\text{л}}, \quad (1)$$

где  $I_{\text{л}}$  – ток в линии;  $R_{\text{л}}$  – сопротивление одной фазы в линии.  
Ток в линии и сопротивление можно выразить так:

$$I_{\text{л}} = \frac{P_{\text{л}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{л.ном}} \cdot \cos \varphi}, \quad (2)$$

$$R_{\text{л}} = \frac{\rho \cdot L_{\text{л}}}{S_{\text{л}}}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{л}}$  – мощность нагрузки, кВт;  $U_{\text{л.ном}}$  – номинальное напряжение сети кВ;  $\cos \varphi$  — коэффициент мощности;  $\rho$  — удельное сопротивление материала жилы кабеля, Ом·мм/мм<sup>2</sup> (для алюминиевых проводов  $\rho_1 = 0,02640,029$ ; для медных  $\rho_2 = 0,017540,018$ ; для стальных  $\rho_3 = 0,0140,14$ );  $L_{\text{л}}$  — длина линии, км;  $S_{\text{л}}$  — сечение линии, мм<sup>2</sup>.

На основании (1) – (3) можно записать:

$$\Delta P_{\text{л}} = \frac{\rho \cdot L_{\text{л}} \cdot P_{\text{л}}^2}{S_{\text{л}} \cdot U_{\text{л.ном}}^2 \cdot \cos^2 \varphi} \quad (4)$$

Из (4) следует, что экономить электроэнергию в кабельных линиях можно за счет:

- 1) сокращения длины линий, например, от цехового трансформатора до приемника электроэнергии;
- 2) увеличения сечений линий до экономически целесообразных значений, определяемых технико-экономическими расчетами (ТЭР);
- 3) повышения cosφ электроустановок;
- 4) увеличения напряжения сети.

Сокращение длины кабельных линий осуществляется за счет:

- рационального распределения приемников электроэнергии между подстанциями с учетом технологических особенностей производства;
- более глубокого подвода ВН к цехам, где устанавливают понижающие подстанции;
- рационального выбора мест размещения подстанций.

Особенно резко уменьшаются потери активной мощности и энергии при увеличении напряжения, так как эти потери обратно пропорциональны квадрату напряжения (4).

Так, если к цехам подвести напряжение 6(10) кВ вместо 0,38 кВ, то потери снизятся в:

$$n_{6/0,38} = \frac{\Delta P_6}{\Delta P_{0,38}} = \frac{6^2}{0,38^2} = 250 \text{ раз}; \quad (5)$$

$$n_{10/0,38} = \frac{\Delta P_{10}}{\Delta P_{0,38}} = \frac{10^2}{0,38^2} = 700 \text{ раз}; \quad (6)$$

Если сравнить 6 и 10 кВ, то:

$$n = \frac{n_{10/0,38}}{n_{6/0,38}} = \frac{700}{250} = 2,84 \text{ раза} \quad (7)$$

На мой взгляд здесь имеется значительный ресурс по экономии электрической энергии. На сегодняшний день большой процент составляют сети напряжением 6 кВ. Поэтому реконструкция сетей с переводом их на напряжение 10 кВ может дать ощутимую экономию электрической энергии. Все это не требует больших капитальных затрат.

## 5. Экономия электроэнергии за счет замены малозагруженных электродвигателей электродвигателями меньшей мощности

При нагрузке электродвигателя в пределах 45–70% номинальной мощности целесообразность его замены двигателем меньшей мощности должна быть обоснована. С этой целью определяют суммарные потери активной мощности в системе электроснабжения и в электродвигателе до замены  $\Delta P_{\Sigma 1}$  и после замены  $\Delta P_{\Sigma 2}$  двигателя. Если окажется, что  $\Delta P_{\Sigma 2} < \Delta P_{\Sigma 1}$  то такая замена целесообразна:

$$\Delta P_{\Sigma} = [Q_x \cdot (1 - k_z^2) + k_z^2 \cdot Q_{\partial.ном}] \cdot k_{и.п} + \Delta P_x + k_z^2 \cdot \Delta P_{з.п} \quad (8)$$

## 6. Экономия электроэнергии при компенсации реактивной мощности

Реактивная мощность потребляется как электроприемниками, так и элементами сети. Реактивная мощность, потребляемая промышленным предприятием, распределяется между ее отдельными видами приемников электроэнергии следующим образом: 65 % приходится на АД, 20-25 % на силовые трансформаторы и около 10 % на воздушные линии и другие электроприемники (люминесцентные лампы, реакторы и т.п.). Этот показатель будет возрастать в связи с внедрением энергосберегающих приемников.

**Компенсация реактивной мощности у потребителя позволяет:**

1. снизить ток в передающих элементах сети, что приводит к уменьшению сечения кабельных и воздушных линий:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{\sqrt{P_p^2 + (Q_{\partial.к} - Q_{кв})^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}, \quad (9)$$

где  $S_p$ ,  $I_p$  – расчетные полная мощность и ток после компенсации реактивной мощности соответственно;  $Q_{\partial.к}$  – реактивная мощность до компенсации;  $Q_{кв}$  – мощность компенсирующих устройств;  $P_p$  – расчетная активная мощность;

2. уменьшить полную мощность, что снижает мощность трансформаторов и их число

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + (Q_{\partial.к} - Q_{кв})^2} < S_p', \quad (10)$$

где  $S_p'$  – расчетные полная мощность до компенсации равная

$$S_p' = \sqrt{P_p^2 + Q_{\partial.к}^2}; \quad (11)$$

3. уменьшить потери активной мощности в сети

При передаче потребителям активной  $P$  и реактивной  $Q$  мощностей в системе электроснабжения имеют место потери активной мощности:

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R = \frac{S^2}{U^2} \cdot R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R, \quad (12)$$

Потери активной мощности при компенсации реактивной мощности ( $Q_{кв}$ ) будут равны

$$\Delta P_{п.к} = \frac{P^2 + (Q - Q_{кв})^2}{U_{ном}^2} \cdot R, \quad (13)$$

В настоящее время нет четкой технической политики по этому вопросу, не разработаны меры, рычаги, которые могли бы стимулировать экономию электроэнергии при компенсации реактивной мощности. Поэтому ни у энергоснабжающей организации, ни у потребителей нет мотивации для этого.

**7. Влияние показателей качества электроэнергии на работу электропотребителей**

Отклонение ПКЭ от нормированных или оптимальных значений проявляется в виде экономического ущерба у потребителей электрической энергии. Данный ущерб имеет электромагнитную и технологическую составляющие. Электромагнитная составляющая определяется в основном дополнительными потерями активной мощности и энергии и сокращением ресурса электрооборудования, например, ввиду ускоренного старения изоляции. Технологическая составляющая ущерба связана с увеличением длительности производственного процесса, со снижением производительности электрооборудования, и следовательно, с увеличением удельного электропотребления на единицу произведенной продукции.

### **7.1 Влияние установившихся отклонений напряжения**

Установившееся отклонение напряжения оказывает наиболее существенное влияние из всех ПКЭ на работу потребителей. Рассмотрим это влияние для различных электропотребителей.

#### *Электрическое освещение*

Ущерб при положительных отклонениях напряжения происходит из-за сокращения срока службы ламп. При  $\Delta U = +10\%$  срок службы ламп сокращается примерно в 3 раза. Ущерб от пониженного отклонения напряжения связан со снижением производительности труда ввиду снижения освещенности.

#### *Асинхронные двигатели*

Отклонения напряжения вызывают дополнительные потери активной мощности, дополнительное потребление реактивной мощности, сокращение срока службы изоляции, снижение производительности механизмов и увеличения удельного расхода электроэнергии ввиду увеличения длительности технологического процесса. При отрицательных значениях отклонений напряжения увеличение тока пропорционально снижению напряжения, а увеличение потерь активной мощности пропорционально квадрату снижения напряжения. В случае повышения напряжения на 1 % реактивная мощность, потребляемая асинхронным двигателем, увеличивается в среднем на 3 %. Следует отметить, что зависимость потерь активной и реактивной мощности от отклонений напряжения в значительной степени зависит от коэффициента загрузки  $K_z$  двигателя.

#### *Электротермическое оборудование*

Снижение напряжения приводит к ухудшению температурного режима, увеличению продолжительности технологического процесса и перерасходу электроэнергии. Например, для дуговых сталеплавильных печей снижение напряжения на 5 % приводит к снижению производительности печи на 10 %.

#### *Электролизное производство*

Отрицательные значения установившегося отклонения напряжения приводят к снижению производительности электролизных ванн и повышению удельных расходов электроэнергии. При снижении напряжения на 10 % производительность электролизных ванн также снижается на 10 %.

### **7.2 Влияние размахов изменения напряжения**

Данный ПКЭ характеризуется колебаниями напряжения сети. Источниками колебаний напряжения в электрических сетях являются электропотребители с резкопеременным режимом работы: дуговые сталеплавильные печи, электроприводы прокатных станов, электродуговая и контактная сварка и т.п. Колебания напряжения отрицательно сказываются на зрительном восприятии человека и снижении ввиду этого производительности труда. Колебания напряжения сказываются на увеличении брака некоторых видов продукции из-за нарушения технологического процесса, на режимах работы систем автоматики и регулирования.

### **7.3 Влияние несинусоидальности напряжения**

Несинусоидальность напряжения неблагоприятно влияет на электрооборудование, автоматику и релейную защиту, системы учета электроэнергии. Данное влияние проявляется в виде дополнительных потерь активной и реактивной мощностей, затруднения компенсации реактивной мощности с помощью батарей конденсаторов, сокращения срока службы изоляции электрооборудования, создания электромагнитных помех системам автоматики, защиты, связи. Уровень дополнительных активных потерь от высших гармоник в сетях электрических систем составляет 2–4 % потерь при синусоидальном напряжении. В сетях предприятий, городских сетях, а также электрифицированного железнодорожного транспорта эти потери могут достигать 10–15 %.

Во многих электрических сетях различных напряжений с источниками высших гармоник батареи конденсаторов практически не работают: они или отключаются защитой от перегрузок по току, или выходят из строя в результате вспучивания, а

иногда и взрывов. Это связано с возникновением резонанса на частоте какой-либо из гармоник, имеющейся в амплитудном спектре напряжения сети. Резонансные контуры образуются емкостью батарей конденсаторов и индуктивностью сети.

#### 7.4 Влияние несимметрии напряжения

Источниками несимметрии напряжений в сетях являются мощные однофазные потребители (индукционные плавильные и нагревательные печи, сварочные агрегаты, коммунально-бытовая нагрузка и др.), а также трехфазные потребители, длительно работающие в несимметричном режиме. При несимметрии напряжений происходит увеличение потребления активной и реактивной мощностей, увеличение потерь электроэнергии, снижение ресурса электрооборудования, снижение вращающего момента асинхронных двигателей и производительности механизмов.

Дополнительные потери активной мощности, обусловленные несимметрией напряжений по обратной последовательности, определяются выражением:

$$\Delta P_2 = \frac{U_{ном}^2 \cdot r_2 \cdot K_{2U}^{*2}}{X_2^2}, \quad (14)$$

где  $r_2$  – активное сопротивление,

$X_2$  – реактивное сопротивление обратной последовательности,

$$K_{2U}^* = \frac{U_2}{U_{ном}} (o.e.), \quad (15)$$

$U_2$  – напряжение обратной последовательности.

Расчеты показывают, что при  $K_{2U}^* = 0.02$ , относительное увеличение потерь  $\Delta P_2 / \Delta P_{ном}$  для асинхронных двигателей составляет порядка 2 - 4 %, для трансформаторов порядка 1 - 4 %, для синхронных двигателей около 4 %.

Сокращение срока службы изоляции составляет от 2 до 16% в зависимости от вида оборудования и стабильного уровня несимметрии напряжений.

Напряжения обратной последовательности создают вращающий момент двойной частоты, направленный в противоположном направлении моменту вращения ротора электрической машины, т.е. создают тормозной электромагнитный момент.

При несимметрии напряжений в синхронных машинах, наряду с возникновением дополнительных потерь и нагревом статора и ротора могут начаться опасные вибрации, вызванные вращающимися моментами, пульсирующими с двойной частотой. Эти моменты появляются как следствие взаимодействия магнитных потоков, созданных токами обратной последовательности в цепях статора и ротора, а также потоков, обусловленных токами прямой последовательности. При значительной несимметрии напряжений вибрация может оказаться опасной и вызывать разрушения сварных соединений.

### 8. Экспериментальное исследование влияния некоторых электроприемников на качество электрической энергии.

На кафедре ЭСПП и СХ ВСГУТ была создана и работает Испытательная электротехническая лаборатория, аккредитованная в Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии, научный руководитель – доцент Данеев В.В. Целью открытия лаборатории было создание центра по решению исследовательских, экспериментальных задач в области электромагнитной совместимости и, в частности, в обеспечении качества электрической энергии. Сотрудниками лаборатории были проведены экспериментальные исследования влияния на качество электрической энергии энергосберегающих ламп («Космос», «Навигатор»), светодиодных ламп, персональных компьютеров. Исследования проводились при помощи измерительно-вычислительного комплекса «Омск-М». Результаты анализа представлены на рис. 1-5.

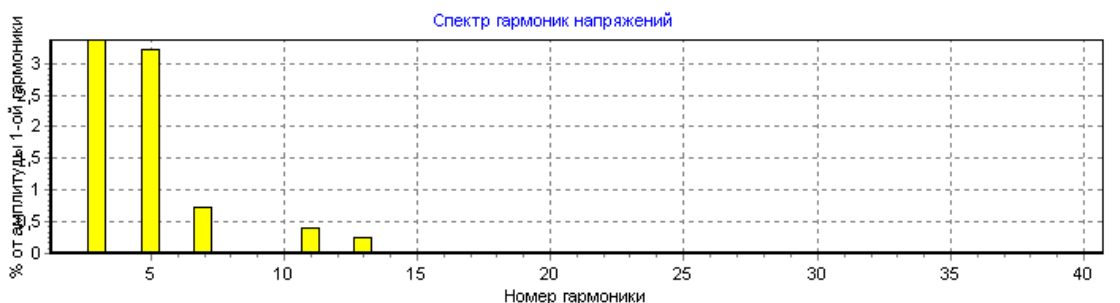


Рис. 1.

Высшие гармонические составляющие тока лампы "Космос", отн. ед.

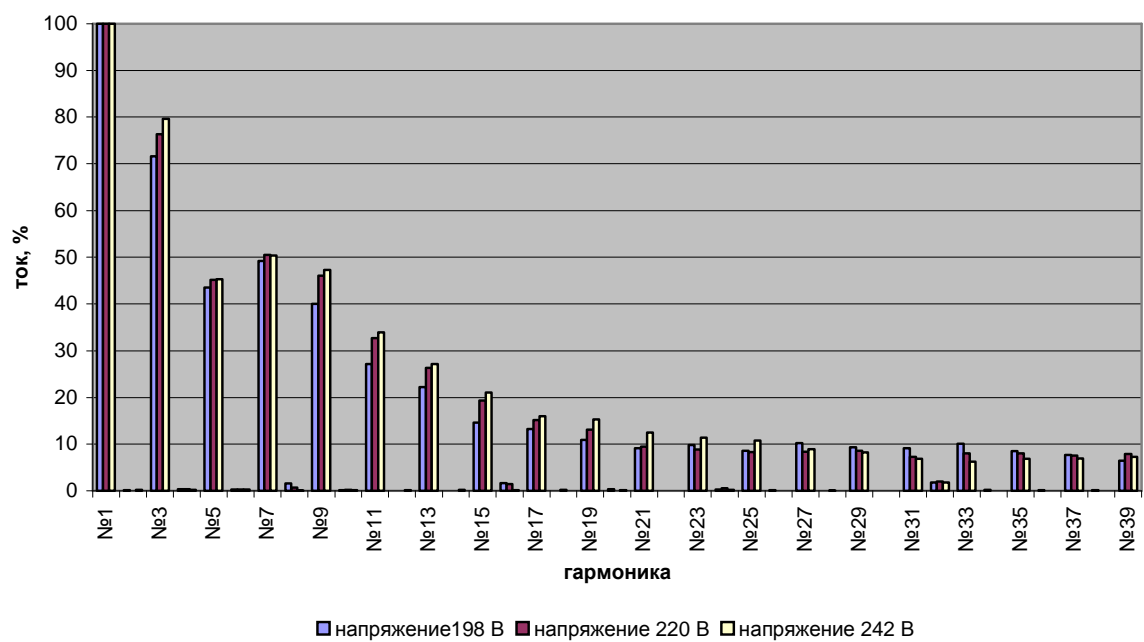


Рис. 2.

### Светильник с двумя люминесцентными лампами по 40 Вт

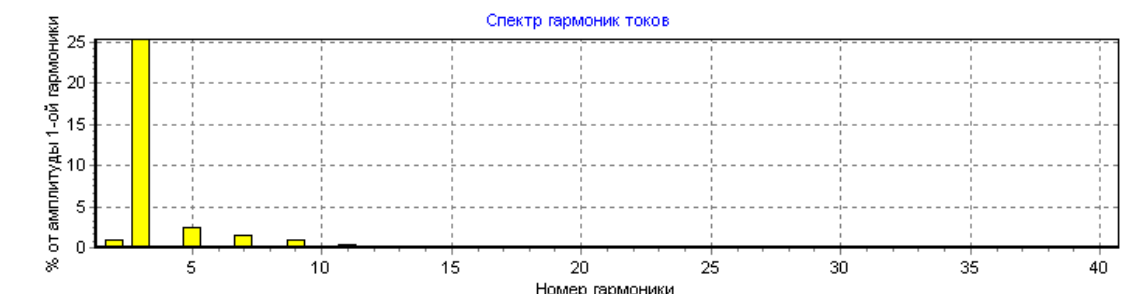


Рис. 3.

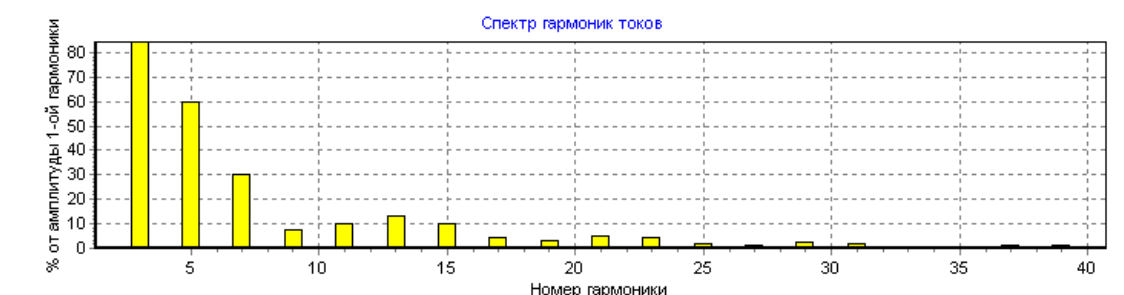
### Светодиодная лампа



Рис. 4.

### Системный блок персонального компьютера

Рис. 5.



На основе анализа можно сделать следующие выводы:

- Внедрение энергосберегающих ламп действительно позволяет экономить активную электрическую энергию.
- Заявленное производителем электропотребление рассмотренных ламп не соответствует реальному потреблению последних; декларируемая величина потребляемой активной мощности превышает измеренную.
- Зависимость потребляемой мощности исследованных ламп от величины питающего напряжения пренебрежимо мала (напряжение изменялось в пределах норм ГОСТ 13109-97).



- Наличие в спектре потребляемого тока данных ламп значительного количества высших гармоник приводит к ухудшению качества электрической энергии в системах электроснабжения.

- Как видно из гармонического состава тока, особенно большую величину имеют третья и кратные ей гармоники. По теории трехфазного переменного тока данные гармоники являются составляющими нулевой последовательности. Они будут суммироваться в нулевом проводе четырехпроводной сети 0,38 кВ. Как видно из диаграмм, величина этого тока в нулевом проводе может быть в 2-3 раза больше, чем фазный ток. В существующих системах электроснабжения это может привести к повреждению (отгоранию) нулевых проводов, возникновению аварийных ситуаций в системах электроснабжения 380-220 В и повреждению большого количества электроприемников.

В связи с этим при массовом внедрении данных ламп должна быть пересмотрена технология проектирования и монтажа систем электроснабжения в плане увеличения сечения нулевого провода и установки фильтрокомпенсирующих устройств.

- Исходя из предыдущего вывода должен быть осуществлен пересмотр технологии проектирования и монтажа систем электроснабжения в плане увеличения сечения нулевого провода.